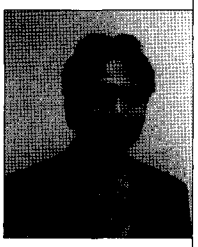
파형강판 복부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 설계와 시공단계 해석

Design and Construction Stage Analyses of Prestressed Concrete Box Girder Bridge with Corrugated Steel Web



김 광 수* 정 광 회**

*현대건설 기술연구소 선임연구원 공학박사
**현대건설 기술연구소 주임연구원

1. 개 요

프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량에 있어서 복부 단면을 플레이트를 입체화한 파형강판으로 대체하는 시도는 프랑스에서 시작되었으며 다수의 교량들이 사용중에 있다. 이와 같은 파형강판 Web PSC박스거더교는 복부 강판의 면외방향 강성 증가를 기대할 수 있으며, 전단력에 대하여도 높은 강성을 발휘하여 보강재 설계를 간소화할 수 있는 장점이 있다.

그러나 실질적인 적용은 일본에서 비약적으로 이루어졌는데, 1990년대 중반을 이후로 신카이교나 혼다니교 등이 준공됨으로써 활발하게 적용되어 오고 있다. 1993년에 준공된 신카이교는 프리캐스트 거더 공법, 1995년에 준공된 마츠노키교는 ILM, 그리고 1998년에 준공된 혼다니교는 FCM에 의하여 가설되었으며, 특히 혼다니교는 중앙 지간장이 97.202m로서 장지간 교량에 본격적으로 적용되는 계기가 되었다.

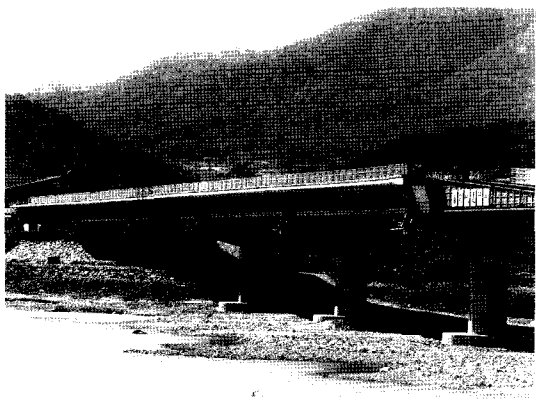


그림 1 ILM에 의한 파형강판 Web PSC교의 시공

이렇게 짧은 기간 동안 많이 적용되어온 파형강판 Web PSC박스거더교는 비약적 발전을 이루어 왔는데, 혼다니교의 경우에는 먼저 콘크리트 플랜지와 복부의 접합방법을 기존의 스터드 접합에서 매입방법으로 변경하였다는 점이 큰 특징 중의 하나이다. 파형강판에 관통 구멍을 내고 철근을 관통시키면서 상·하 단부에 철근을 용접하여 매입하는 방법을 채택하였다. 파형강판의 접합에 있어서도 혼다니교는 당시의 방식과는 달리, 고장력 볼트에 의한 일면 마찰접합 방식을 채택하였다. 이러한 접합방법은 접합부에 축방향력이 작용하는 경우에는 편심 모멘트의 발생 우려로 일반적으로는 적절하지 않지만, PSC박스거더의 복부에서는 아코디언 효과에 의해 축방향력이 거의 작용하지 않으므로 채택이 가능하다.

물론, 혼다니교에서 적용된 플랜지와 복부의 접합 방법, 그리고 파형강판의 접합방법은 많은 실험적 연구과 현장 적용을 통하여 꾸준하게 개선되어 오고 있으며, 이를 통하여 일반적인 거더교는 물론 다양한 형식의 교량에 적용하

표 1 파형강판 Web PSC교 주요 적용 사례

교 량 명	경 간 (M)	폭(m)	최대 경간장(m)	위 치	비 고
Cognac교	2@31.0+43.0=105.0	11.7	43.0	프랑스	
Maupre교	2@40.95+2@47.25+44.1 +53.55+50.4=324.45	10.8	53.55	프랑스	7경간 연속
Asferix교	2@37.4=74.8	13.0	37.4	프랑스	7경간 연속
Dole교	2@48.0+5@80.0=496.0	14.5	80.0	프랑스	
신카이교 (新開橋)	31.0	14.8	31.0	일 본	Precast Girder
마츠노키교 (銀山御辛橋)	28.0+4@45.5=210.0	9.7	45.5	일 본	
혼다니교 (本谷橋)	44.513+97.202+56.478 =198.193	11.04	97.202	일 본	
리토교 (栗東橋)	137.6+170+115+67.6=490.2 (Tokyo bound)	19.6	170	일 본	E/D교
야하기가와교	173.4+2@235+173.4=816.8	43.8	235	일 본	사장교
일선대교	50+10@60+50+2@50.5=801	21.2	60	한 국	

는 계기가 되고 있는데, 최근에는 사장교나 Extradosed교까지 그 적용범위를 확장시키고 있다.

2. 파형강판 복부를 갖는 교량의 설계

2.1 설계 일반

파형강판 Web PSC교의 설계는 휨에 대한 콘크리트 부재의 설계와 전단에 대한 복부 파형강판의 설계로 크게 나눌 수 있다. 아직 국내에는 별도의 설계 규준이 없으나 일본에서는 전문 협회들을 중심으로 기준안의 제정과 개정에 많은 노력을 기울이고 있다. 예를 들어 거더의 휨계산 과정에 있어서 단면의 평면유지 가정은 성립되지 않는 경우를 고려한 설계가 요구된다는 사실도 제시되고 있다.

구조물의 설계에서 파형강판은 교축 방향으로의 휨과 축력에 대해서는 저항하지 않는 것으로 해석하여 설계하며, 이는 다수의 해석적 연구를 통해서 확인되기도 한다. 현대건설에서 시공중인 파형강판 Web PSC박스거더교인 일선대교를 대상으로 축강성 분담율을 검토한 결과 약 1%로 나타나 20%를 상회하는 일반적인 PSC박스거더 교량의 경우에 비해서 매우 미미한 것으로 분석되었다.

파형강판 Web PSC교는 복부의 콘크리트 부재를 얇은 두께의 강판으로 대체하였으므로 비틀림 거동에 대한 적절한 평가가 필수적이다. 일반 PSC박스거더교와 파형강판 Web PSC박스거더교의 강성을 비교한 일본 자료에 따르면 단면적과 단면2차 모멘트의 감소와 함께 휨 강성의 경우 지점부에서는 약 20%, 지간 중앙부에서는 약 10% 정도로 낮은 값을 보이게 된다. 그러나 비틀림 강성의 경우 지점부에서는 약 70%, 지간 중앙부에서는 약 60%가량의 감소를 보이게 된다. 특히 이러한 비틀림 거동과 관련하여서는 시공중에 있어서의 프리스트레싱 공정에 대한 합리적 분석을 바탕으로 구조물의 안정성에 대한 검토가 필수적으로 수행되어야 할 것이다.

이에 따라 충분한 강성을 지닌 횡형·격벽을 적절한 간격으로 설치하는 것이 중요하며 PC강재를 정착·편향하는 횡형·격벽은 PC강재의 인장력 또는 편향력을 주형에 확실히 전달함과 동시에 주형에 대하여 충분히 안전한 구조로 설계되어야한다. 편향부 또한 강성이 높은 격벽타입으로 형상을 설정하는 것이 안정적인 것으로 인식되고 있다.

전단에 대해서는 복부 파형강판이 저항하는 것으로 해석하여 설계하는데 가장 활용 실적이 많은 일본에서는 설계전단내력을 복부파형강판의 기여분인 V_{wd}과 프리스트레싱 긴장재의 기여분 V_{ped}를 합하여 산정하도록 제시하고 있다. 이때 적용되는 부재계수 γ_b는 콘크리트 복부의 1.3에 비하여 1.15를 표준으로 적용할 수 있도록 규정하고 있다.

2.2 파형강판의 설계

교량 구조물 적용을 위한 파형강판의 국내 설계기준은 마련되어 있지 않지만 북미나 유럽, 그리고 일본을 중심으로 전단거동에 대한 많은 연구가 수행되고 합리적 설계기준을 갖추기 위한 시도들은 꾸준하게 이루어져 왔다. 국부좌굴 상태에 이르는 응력, $\tau_{cr,L}$은 일반 이론을 통하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau_{cr} = k_s \left[\frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} (w/t)^2 \right] \quad (1)$$

여기서, k_s : 좌굴계수
w : 복부 두께
μ : Poisson's ratio

좌굴계수 k_s에 대한 각 국가별 분석방법은 다소 차이가 있다. 좌우 경계조건을 단순지지로 보는 관점은 동일하지만 캐나다의 경우 Longer Edges Simply Supported, Shorter Edges Clamped의 조건으로 해석하여 좌굴계수를 제시하고 있다. 이러한 국부좌굴 분석을 통하여 패널 폭과 두께가 결정되며 파형 강판의 높이는 다음과 같은 전체좌굴 응력에 대한 고려를 바탕으로 결정될 수 있다.

$$\tau_{cr,G} = 36.3 \left[\frac{(E I_y)^{0.25} (E I_x)^{0.75}}{t h^2} \right] \quad (2)$$

위와 같이 Easley에 의하여 정리된 전체 좌굴강도 계산식에서 β는 복부 상·하단에서의 면외 회전 구속도에 따라 1.0~1.9의 범위에 있는 것으로 평가된다. 또한, 파형강판 Web PSC교의 경우에는 일반적인 PSC 박스거더에 비하여 비틀림 강성이 저하한다. 이에 따라 비틀림 안정성 검토는 보다 면밀하게 수행될 필요가 있으며, 비틀림 정수는 다음과 같은 수정식이 제안되어 있다.

$$J_t = \frac{4 A_m^2}{\frac{h_1}{n_c t_1 (1+\alpha)} + \frac{b_1}{t_2 (1-\alpha)} + \frac{h_1}{n_c t_3 (1+\alpha)} + \frac{b_1}{t_4 (1-\alpha)}} \quad (3)$$

여기서, $\alpha = 0.400 \frac{h_1}{b_1} - 0.060$

수정계수 α는 양의 값을 가져야 하며 $\frac{h_1}{b_1}$이 0.2이하가 되는 경우에는 수정계수를 0으로 하여도 좋은 것으로 권고하고 있다. 한편, 파형강판의 휨 강성은 무시될 수 있는 것으로 평가되고 있으며, 파형강판 Web구조의 휨강도는 플랜지에 의하여 결정되고 휨 거동에 의한 복부에서의 응력은 일부 영역을 제외하고는 거의 발생하지 않는 것으로 알려지고 있다.

2.3 내, 외부 강선의 병용 구조

파형강판 Web PSC교는 콘크리트 복부가 없으므로 일반적인 내부 강선만으로 외력과 자중을 모두 부담하기에는 무리가 있다. 이에 따라 외부 강선의 적용이 필수적이며 상·하부 플랜지에 배치된 내부 강선과 함께 병용하는 것이 일반적이다. 이러한 경우 가설시의 단면력과 자중을 부 케이블이 부담하고 완성후의 활하중을 외부 케이블 부담하도록 설계하는 것이 적절한 것으로 인식되고 있다. 그러나 이러한 병용구조에서 내부 강선과 외부 강선의 비율은 경간장과 부재 단면 설계, 그리고 가설 방식에 따라서 많은 영향을 받게 된다.

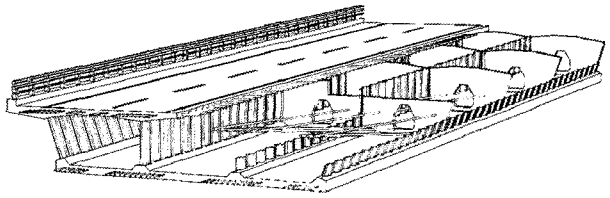


그림 2 내외부 강선이 병용된 일선대교 단면

이러한 외부 케이블 공법은 독일에서 1920년대 후반에 적용되기 시작한 이래 1980년대부터 교량에 다수 적용되기 시작하였다. 내·외부 강선이 병용된 기존의 교량에서 외부 강선이 차지하는 비율은 20%~80%까지 매우 다양하게 분포하고 있는데, 특히 외부 케이블 구조의 거동을 정확하게 반영하기 위해서는 비선형 해석이 필수적이지만 시간과 비용에서의 약점이 있다. 이에 따라 외부 강선의 응력 증가량 산정을 위한 간략식을 바탕으로 극한 휨강도의 결정을 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 그러나 외부 강선이 적용된 구조에 있어서 강선의 응력 증가량은 구조형식, 지간, 내/외부 케이블의 비 등에 따라서 많은 영향을 받으므로 단순식을 통한 간략적 방법에 의한 강도 계산을 위해서는 보다 추가적인 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 사료된다.

또한 PS강재의 정착부 설계에 있어서도 파형강판 Web PSC교량과 일반적인 PSC박스거더 교량의 전단강성이나 축방향 강성차를 고려하여 설계할 필요가 있다. 특히 정착위치로부터 프리스트레스가 유효하게 작용하는 단면까지의 거리가 길어질 것을 예상하고, 이를 설계과정에서 반영하는 것이 적절할 것이다.

2.4 연결부의 설계 및 시공

파형강판 Web PSC교량에 있어서 콘크리트 슬래브와 파형강판 Web의 접합부는 가장 중요한 구성요소라 할 수 있다. 기존의 시공 사례를 바탕으로 분석하면 접합방법으로는 스터드에 의한 접합, 매입 접합, 앵글에 의한 접합, 구멍강판에 의한 접합 등으로 크게 나눌 수 있다.

스터드에 의한 접합은 강형과 콘크리트 슬래브의 접합에 일반적으로 사용되고 시공실적이 가장 많아 설계방법이 확립되어 있다. 이러한 방식으로 설계하는 경우 플랜지 플레이트와 스터드의 용접에 따른 경제성 측면에서의 약

점이 있다. 그러나 플랜지 플레이트에 의한 시공성 및 내구성 증진효과를 기대할 수 있으며, 향후 바닥판을 교환하는 경우에도 상대적으로 유리한 방법으로 인식되고 있다. 매입접합은 파형강판의 상·하단에 축방향의 철근을 용접한 후 파형강판에 구멍을 만들어 여기에 교축직각방향의 철근을 관통하여 콘크리트 슬래브에 매입하는 접합방법이다. 물론 이 방법의 경우 스터드 접합에 필요한 플랜지 플레이트의 용접과 스터드의 용접을 생략할 수 있는 장점이 있다.

프랑스에서 개발된 앵글을 이용한 접합방법은 횡방향의 휨 거동에 대한 높은 저항성과 추가적인 철근배치로 콘크리트 플랜지와의 일체성을 높일 수 있는 방법으로 인식되고 있다. 특히 스터드 방식과 같이 플랜지 플레이트가 용접되므로 파형강판의 직선성 유지와 거푸집 시공이 용이하다는 장점이 있다. 한편으로는 앵글의 용접에 따른 구조적, 경제적 문제점이 발생할 수 있으므로 접합방식에 대하여는 해외는 물론 국내에서도 기술개발 노력이 계속되고 있으며, 접합 방법을 설계하는 경우 교량의 형상과 제원, 그리고 환경에 따른 신중한 접근이 요망된다.

또한, 파형강판은 가공상이나 운반상 혹은 시공상의 제한으로 교축방향으로 분할되어 현장에 투입되므로 주형가설시에 교축방향으로 접합하게 된다. 파형강판 Web은 그 특성상 교축방향의 강성이 극히 작아 축방향력을 분담하지 않으므로 강판의 접합부는 전단력에 대해서만 고려하면 된다. 고장력볼트 접합에는 축방향 응력을 고려하지 않아도 되기 때문에 휨 모멘트에 저항하는 모멘트 plate가 필요하지 않으며 용접접합에도 축방향 응력을 무시할 수 있기 때문에 필렛용접에 의한 겹이음을 채용하는 것이 가능하다.

3. 압출공법의 적용을 위한 시공단계 해석

3.1 개 요

현재 시공중인 일선대교는 국내에서는 처음으로 복부에 파형강판을 적용한 PSC교량으로 압출공법을 적용하고 있다. 일선대교는 H=3.5m를 채택하여 1/17.2의 형고비를 갖게 되고, 상행선과 하행선의 일체식 단면을 적용하여 하상작업시간을 최소화하고, 경제성 및 시공상의 장점을 기하고 있다. 따라서 일반구간 21.2m, 확폭구간 30.91m의 교폭을 갖는 3 Cell단면으로 구성되며, 횡방향 프리스트레스를 도입하게 되는데 단면형상은 다음과 같다.

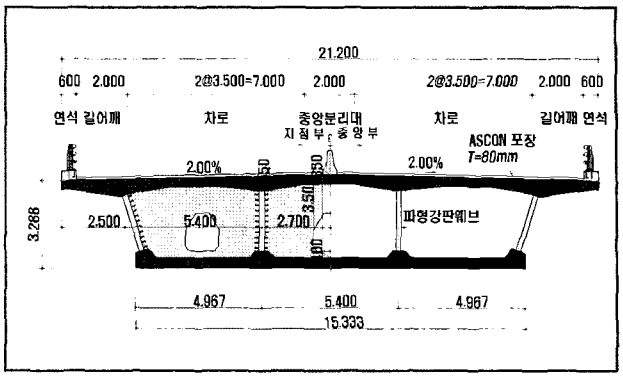


그림 3 일선대교 일반구간 횡단면도

종방향 텐던은 Internal Tendon과 External Tendon을 병용하게 되는데, Internal Tendon은 시공중 하중을 분담하게 되며 부착강선으로 설계되었는데 상·하부 콘크리트 플랜지에 배치된다. External Tendon은 2차 고정하중과 활하중을 분담하여 박스거더에서 발생하는 단면력을 고려하여 배치된다. 격벽은 External Tendon의 정착부나 편향부 (Deviator)역할을 하게 되는데, 비틀림 강성의 증가를 위하여 12m간격으로 배치되었다.

파형강판의 형상은 구조적으로 많은 영향을 미치게 되는데 파고는 전체 좌굴과 아코디언 효과에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 파형강판의 패널 폭은 파형강판의 접합를 고려하여 설계되어야 하며, 국부좌굴에도 영향을 줄 수 있는 요소이다. 파형강판의 파장은 패널 폭과 파고 등에 의하여 결정되지만, 격벽의 간격과 지간장 등에 의하여 등간격으로 패치되는 것이 유리할 것이다. 특히, 파형강판의 파고를 작게할 경우 횡방향 강성이나 아코디언 효과의 저하가 발생할 수 있으며, 전단 좌굴 성능의 감소도 야기될 수 있다. 일선대교의 파형강판은 평행 패널폭 330mm, 경사 패널폭 270mm를 채택하고 있으며, 200mm의 파고와 1,200mm의 파장을 갖도록 설계되었다.

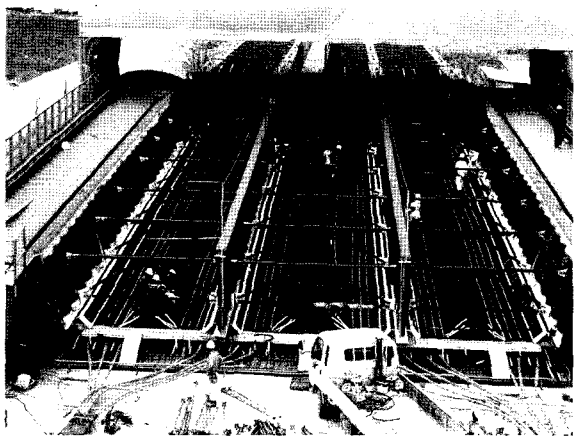


그림 4 일선대교의 시공

파형강판의 교축방향 이음은 필렛 용접과 일면 전 볼트이음이 가능한데, 이는 파형강판 Web의 교축방향 강성이 극히 작고 전단력만 존재하는 구조상의 특징에 따른 것이다. 일선대교는 시공이 간편하고 이음부의 미관이 우수하며 품질 신뢰성이 뛰어난 필렛 용접 이음을 채택하고 있다.

3.2 시공단계별 해석 및 안전성 검토

일선대교의 시공 중 안전성을 검증하기 위하여 시공단계별 해석을 실시하였다. 일선대교는 파형강판 복부를 갖는 PSC교량 가운데 세계 최대 폭인 21.2m의 폭을 갖는 교량이며, 교량의 길이도 800m로 역시 세계 최대이다. 특히, 일선대교는 ILM공법으로 시공되기 때문에 종방향 응력분포가 각 시공단계별로 바뀌게 되며, 이러한 응력의 변화가 시공품질에도 큰 영향을 미칠 수 있으므로 교량을 3차원으로 정밀하게 모델링하여 시공단계별로 안전성을 검토하게 되었다.

일선대교에 대한 모델링은 콘크리트를 Solid요소로, 파형강판을 Shell요소, 그리고 텐던을 Bar요소를 사용하였으며, 추진코는 실제와 동일한 강성을 갖는 Shell요소를 적용하였다. 또한, 하중은 텐던에 종방향 압축력만을 시공단계에 맞추어 도입하였고, 해석프로그램은 DIANA를 사용하였다. 그림 5는 7번째 segment까지 압출한 단계를 모델링한 것으로 교각에서의 부모멘트가 가장 크게 발생하는 단계이며 프리스트레스의 도입에도 불구하고 상부 콘크리트 플랜지에서의 인장응력이 발생할 것으로 예측되는 단계이다.

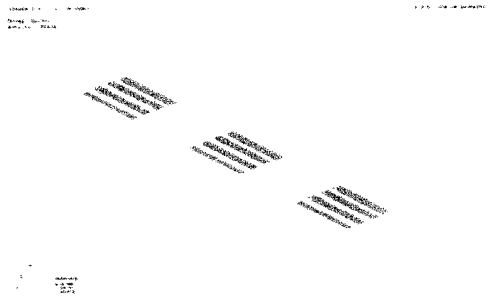


그림 5 일선대교 3D 모델링

그림 6 복부 파형강판 및 시점부 격벽 모델링

압출공법에 의하여 시공되는 교량의 시공단계별 단면력은 Launching Nose와 교량의 강성비, 자중 분포, 그리고 연결부 격벽의 자중에 의하여 영향을 받게 된다. 대상 교량의 최대 단면력은 추진코의 선단이 진행방향의 교각 상단에 위치하기 직전에 가장 크게 발생하지만 순간적인 단면력이며, 시공단계상으로는 연결부 격벽이 경간내에 위치하는 단계가 가장 큰 단면력을 유발하게 된다. 이와 같이 검토 대상이 되는 시공단계에 있어서의 처짐형상은 그림 7과 같다.

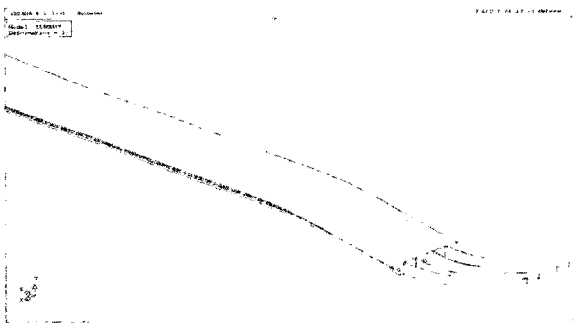


그림 7 일선대교 압출에 따른 처짐형상

그림 8은 인장영역과 압축영역으로 나누어 종방향 응력을 나타낸 것이다. 2번째 교각(P2) 상부 슬래브 부분에서 인장응력이 나타나고 있는 것을 볼 수 있으며, 단면의 응력 분포를 보면 내측 복부 상단에서 가장 큰 인장응력을 나타내었다. 한편 그 인장응력의 크기는 15~17kg/cm^{2}으로 균열이 발생할 정도는 아니지만 시공시 각별한 콘크리트 품질관리가 요구될 것으로 판단되었다.

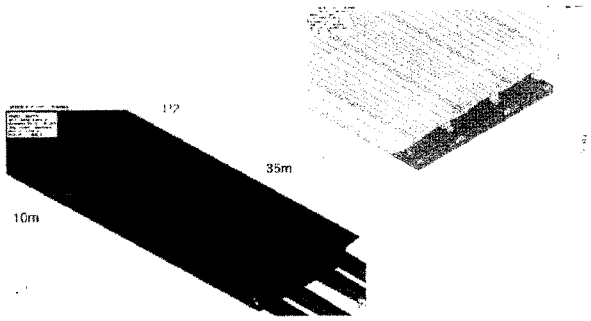


그림 8 부모멘트 발생 영역에서의 응력분포

4. 결 론

기존의 가장 일반적인 구조형식으로 인식

구조와 강구조를 구조적 성능은 물론, 경제적 효과를 얻기 위하여 동일 단면이나 일정 구조물에 동시에 적용한 복합구조(Hybrid Structure)는 최근 들어 더욱 활발하게 적용되어 오고 있다. 프리스트레스트 콘크리트 교량에 있어서도 합성구조, 혼합구조 등에 대한 기술 개발을 바탕으로 진보적 형식의 교량들이 설계 및 시공되고 있으며 신자재 및 신기술의 도입으로 기존의 교량형식 분류를 무색하게 하고 있다.

파형강판은 토목구조물에 적용될 수 있는 효율적인 신구조형식으로서 프리스트레스트 콘크리트 부재와 조합하여 매우 뛰어난 구조물을 설계할 수 있다. 자중의 경감과 구조적 효율성은 파형강판의 교량 적용 가능성을 높게 하는 요인이라 할 것이다. 다만, 설계과정이 보다 용이할 수 있도록 관련 규준의 개발과 제정이 요구되며, 구조물의 상세 거동에 대한 해석 및 실험 연구가 꾸준이 지속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김광수, 김우종, "프리스트레스트 콘크리트 교량의 발전 및 전망", 한국콘크리트학회지 제16권 1호, 2004, pp.22-32
2. 김광수, 박종화, 신철호, "Extradosed교의 설계 및 시공", C-Click Vol.17, Spring 2004, 현대건설주식회사
3. 이종득, "합성구조와 복합교량", 2002, 291pp.
4. 주성문, 조충영, 김명철, "파형강판 Web PSC 상형교의 계획과 설계", 대한토목학회지 제50권 제12호, 2002. 12, pp.38-43
5. 포항산업과학연구원, "복합구조형식 강교량 기술개발", 2003, 188pp.
6. 현대건설, 유신코퍼레이션, "파형강판 Web PSC 박스거더교 - 계획, 설계, 시공, 유지관리 및 기타", 현대건설, 2001
7. 현대건설 기술연구소, "합성구조 및 복합교량 Workshop", 2003
8. 野村國勝, 梶川靖治, "複合構造橋梁", 1994, 250pp.
9. 土木學會, "複合構造物設計・施工指針(案)", 1997, 199pp.
10. 社團法人　プレストレストコンクリート技術協會, "複合橋設計施工規準(案)", 平成11年 273pp.
11. 波形鋼板ウェブ合成構造委員會, "波形鋼板ウェブPC橋 計劃マニュアル (案), 平成10年, 95pp.
12. Elgaaly, M., Seshadri, A., Rodriquez, R., and Ibrahim, S., "Bridge Girders with Corrugated Webs", Fifth International Bridge Engineering Conference, TRR 1696, 2000
13. Masataka, S. and Keiichi, A., "PC Bridges with Corrugated Steel Web - Outline of Planning and Design -", 橋梁と基礎 Vol.36 No.8, 2002, pp.8-19
14. Menn, C., "Prestressed Concrete Bridges", 1989
15. Mochizuki, H., Yamada, M. and Ando, H, "Design and Construction of Mixed Girder Bridge - Shinkawa Bridge", 橋梁と基礎 Vol.34 No.11, 2000, pp.2-11
16. Virlogeux, M., "New Trends in Prestressed Concrete Bridge", Fifth International Bridge Engineering Conference, TRR 1696, 2000
17. Yamazaki, J., "Hybrid Bridges from a Viewpoint of Concrete Side", 橋梁と基礎 Vol.36 No.8, 2002, pp.7-8